

# 列车荷载作用下 X 形桩-网复合地基 动力响应研究

陈育民<sup>1,2</sup>, 谢云飞<sup>1,2</sup>, 薛珊珊<sup>1,2</sup>, 张鑫磊<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 基于大比例 X 形桩-网复合地基模型, 开展了高速铁路列车荷载下桩-网复合地基的动力特性试验研究, 分析了不同车速情况下地基土的振动速度、动应力和动位移的分布特性, 探讨了循环荷载下轨道路堤地基系统的振动响应和路堤内部动应力的分布特征和衰减规律。采用 PLAXIS 3D 建立数值分析模型, 研究了不同列车轴重及振动频率对路堤振动速度响应的影响, 对比了无筋路堤与双层土工格栅加筋路堤在动荷载作用下桩顶与桩间土竖向应力的分布规律。结果表明: 轨道板表面处竖向位移随时间呈“M”形周期性变化; 竖向速度响应在路堤表层处最大, 沿地基横向及深度方向逐渐衰减, 在路堤中衰减了近 90%。随着加载频率及加载幅值的增大, 土体振动速度逐渐增大。动荷载对无筋路堤影响显著, 土拱效应明显减弱, 桩土应力比值随加载频率的提高逐渐减小。土工格栅加筋路堤张力膜效应能够减小动荷载对复合地基的影响。

**关键词:** 高速铁路; X 形桩; 桩-网复合地基; 桩土动力相互作用

**中图分类号:** U266; TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)04-0857-09

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.04.009

## 引言

高速铁路因具有运行周期长, 列车运行速度快等特点, 其沉降控制要求比普通铁路更为严格。桩-网复合地基具有施工快、经济性好、沉降量小以及稳定性高等优点, 在高速铁路地基处理中得到了广泛的运用, 比如武广高铁线, 京沪高铁线、遂渝高铁线等。

虽然桩-网复合地基在实践中已经得到了很好的应用, 但是由于其在动力作用下的工作机理复杂, 国内外研究还不够充分, 主要是通过户外测试和室内试验等手段来分析研究。

Heekl<sup>[1]</sup>对列车振动机理进行分析时发现除了过枕频率外, 轮对通过频率也是列车振动所产生的主要频率。Takemiya 等<sup>[2]</sup>对车速 240 km/h 的新干线线路上的测试数据进行了分析, 得出路基所受到的脉冲冲击与轮对间距离有关。Bahrekazemi 等<sup>[3]</sup>根据实测数据对列车引起的振动的基本动力规律做了分析。在国内, 肖宏等<sup>[4]</sup>为研究桩-网结构路基在不同列车荷载作用下的响应规律, 对无砟轨道桩-网

结构路基进行现场动车组和货物列车试验测试。

相较于现场测试的局限性和不可控性, 大比例模型试验是研究轨道路基相互作用的有效手段。Anderson 等<sup>[5]</sup>建立了双层道砟物理模型, 研究了重复荷载长期作用下道砟结构层的材料动力性能。Cox 等<sup>[6]</sup>对不同类型的浮置板和扣件系统进行了室内试验的对比研究, 模拟单个轮轴荷载定点加载下的浮置板振动特性。许朝阳等<sup>[7]</sup>采用可视化模型试验和颗粒流数值模拟相结合的方法, 分析了动载作用下填土高度、桩帽、桩距、加筋形式、荷载频率等因素对桩承式路堤应力传递的影响。Momoya 等<sup>[8]</sup>进行了 1:5 比例尺有砟轨道室内模型试验, 研究了移动荷载下路基内部应力的分布特征与沉降发展规律, 其考虑的车速较低, 仅为 42 km/h。Shaer 等<sup>[9]</sup>通过含有 3 个轨枕的 1:3 有砟轨道模型, 研究了路基沉降与轨枕振动加速度的关系。Ishikawa 等<sup>[10]</sup>通过相似比为 1:5 的有砟轨道室内模型试验, 比较了定点加载与移动加载两种加载方式下路基内部应力路径的不同, 揭示了移动荷载下主应力轴的旋转特性及其对路基永久变形的影响, 结果表明移动荷载会导致路基产生更大的永久变形。然而在这些试验

**收稿日期:** 2020-09-24; **修订日期:** 2021-01-08

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(51879090); 重点国际合作研究项目(51420105013); 中央高校基本科研业务费资助项目(2018B43214)。

中,对于实际不同列车速度作用下桩-网复合地基的瞬态动力响应的研究还是涉及较少。

X形桩是横截面为X形的异形桩,由于X形桩具有较大的周长面积比,因而可以在不增加桩身混凝土用量的前提下大大提高单桩承载力,从而提高性价比。刘汉龙等<sup>[11-12]</sup>针对X形桩静力条件下承载机理及工程应用方面开展了研究。尹锋等<sup>[13]</sup>基于大比例模型试验,采用半正弦波模拟移动车辆荷载,初步揭示了车辆载重和动荷载对X形桩桩-网复合地基的影响机制。但是对于高速铁路动力作用下X形桩的工作性状的研究目前较少。

此外,国内众多学者<sup>[14-18]</sup>通过模型试验和数值计算手段研究了桩承式路堤在不同荷载作用下土拱效应变化规律。

根据高速铁路桩-网路基地基典型设计工况以及高速铁路施工标准,本文设计了1:5大比例桩-网复合路堤地基模型,在粉土地基中开展列车荷载作用下轨道路基地基系统的动力响应研究,探讨列车移动荷载下轨道路基地基系统的振动响应、路基地基内部动应力的分布特征和衰减规律。

## 1 大比例桩-网复合地基模型

### 1.1 模型概况

为保证高速列车的运行要求,高速铁路各结构层的尺寸和填筑质量均有严格的要求。前期已建造完成了1:5比尺的高速铁路路基地基模型,模型尺寸长宽高为5 m×4 m×7 m,试验地基模型从上到下依次为轨道板、CA砂浆、基床表层、基床底层、碎石垫层、土工格栅和地基粉土,模型槽断面如图1所示。

本系统的激振器设备最大试验力为200 kN,试验力测量精度为±0.5%,作动器行程为±150 mm,位移示值精度为±1%,作动器频率为0.1~40 Hz。激振器控制器为德国MOOG公司生产的控制器,可根据列车荷载和运行速度的大小,设置不同的振动波形,模拟高速铁路荷载的循环加载。

### 1.2 地基土及碎石垫层

试验模型采用28根材料尺寸一致的X形桩,试验桩的设计桩长为3950 mm,开弧间距为39.5 mm,外包圆半径为76 mm,开弧角度为90°。地基土填筑至距槽底0.887 m高度时,将X形桩按照梅花形布置埋设,桩间距为600 mm。布置桩的同时保证桩的垂直度,利用脚手架将其固定,再按填土要求分层填筑并夯实。

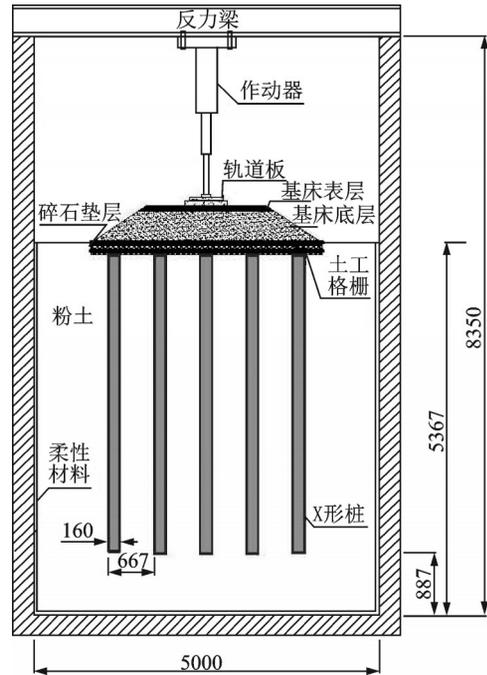


图1 模型槽断面示意图(单位:mm)

Fig.1 Schematic diagram of groove cross section of model (Unit: mm)

通过室内土工试验测定本次试验填筑的粉土地基的基本物理参数,结果如表1所示。

表1 粉土基本物理指标

Tab.1 Basic physical indices of silt

含水率/ %	重度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	孔隙比	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	液限 指数
27.8	18.6	0.817	31.0	24.1	6.9	0.56

基床表层采用级配碎石,基床底层采用A,B组填料,而垫层采用级配良好、未经风化的碎石或砾石类填料,其最大粒径小于25 mm,在碎砾石中掺10%~12%的石粉或细颗粒,搅拌均匀后进行填筑。桩-网复合地基中使用的格栅拉伸屈服力为30 kN/m,路堤横断面仪器布置如图2所示。

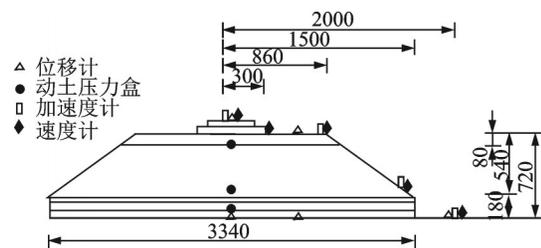


图2 仪器布置图(单位:mm)

Fig.2 Layout of instruments (Unit: mm)

### 1.3 加载方法及设计

通过控制作动器的加载频率以及相邻作动器之间的相位差可以模拟不同的列车运行速度。作动器

上安装有荷载传感器,能够实时监测作动器的荷载。列车轮轴与钢轨相互作用,产生的轮轨荷载通过扣件系统传递至轨道结构和路基中。根据国内外现场实测数据可知,列车轮轨作用荷载在运行过程中是以类似M形波的动荷载形式向路堤地基传递,因此,本次试验采用的荷载波为M形波,波形如图3所示。

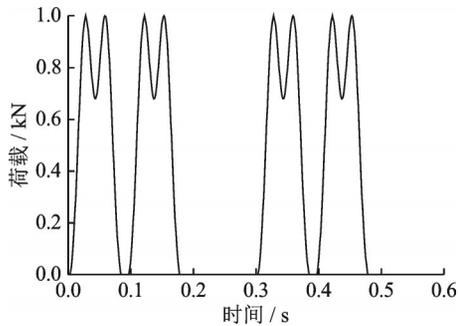


图3 动力加载波时程曲线

Fig. 3 Time-history curve of dynamic loading waves

该波形根据时程曲线的变化规律与周期特性,采用3阶傅里叶级数拟合,设 $t$ 为时间, $F(t)$ 为作动器作用力方程;其表达式为:

$$F(t) = a_0 + a_1 \cos(\omega t) + b_1 \sin(\omega t) + a_2 \cos(2\omega t) + b_2 \sin(2\omega t) + a_3 \cos(3\omega t) + b_3 \sin(3\omega t) \quad (1)$$

式中  $t$  为时间,  $\omega$  为角速度。

本文列车参照国内高速铁路运营的主型车辆CRH3/CRH380型动车组,施加的力为相邻车厢相邻转向架的四对轮载,通过一个转向架距离(2.5 m)的时间为两个荷载周期。列车荷载的大小和运行速度通过伺服激振器的荷载输出和频率来反映,列车速度与加载频率的对照关系如表2所示。

表2 车速与频率对照表

Tab. 2 Relationship between frequency and train speed

作动器频率/Hz	两峰周期/s	对应车速/(km·h <sup>-1</sup> )	两个波谷周期/s	车厢周期/s
18	0.056	160	0.173	0.556
22	0.045	200	0.142	0.455
28	0.036	250	0.111	0.357
33	0.030	300	0.095	0.303
39	0.026	350	0.080	0.256

## 2 模型试验结果分析

### 2.1 竖向速度分析

在M形波循环荷载作用下,复合地基速度时程响应曲线也呈现明显的周期性规律,且速度响应的

频率与循环荷载的频率相一致。

当加载频率为33 Hz时,模型不同深度位置处的竖向振动速度时程曲线如图4所示,速度振动方向以重力方向为正,基床表层正向速度幅值为1.33 mm/s,基床底层正向速度幅值为0.9 mm/s,地基层正向速度幅值为0.48 mm/s。基床底层和地基层的振动速度分别为基床表层速度的67%及36%。

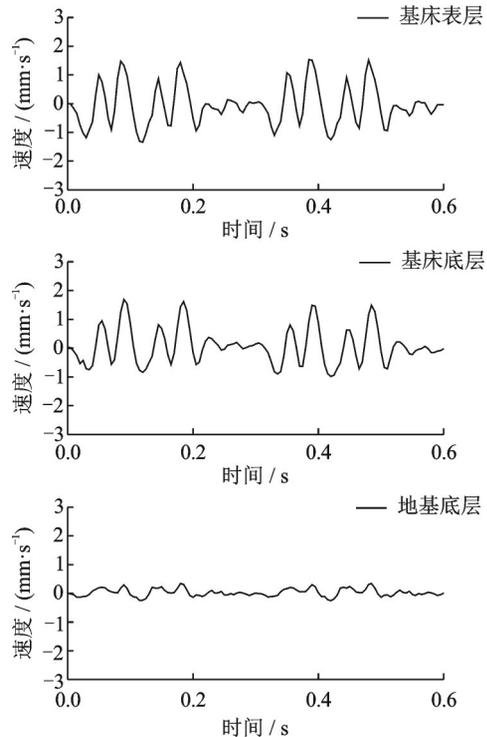


图4 不同位置竖向速度时程曲线

Fig. 4 Time-history curve of vertical velocity at different positions

在路基表层由循环荷载引起的振动速度时程响应曲线呈现明显的M形,且随着深度的增加,M形速度幅值逐渐减小。由于振动波在向地基中传播的过程中,振动能量会被路堤和地基土大量吸收,振动速度沿深度逐渐衰减。

不同加载频率下,复合地基竖向振动速度响应幅值随路堤横向的分布规律如图5所示。由图5可知,在整个系统中离作动器最近的轨道板结构振动响应最为剧烈,在加载频率为39 Hz时振动速度峰值达到43.78 mm/s,而路基结构的最大振动速度仅为1.02 mm/s;路基系统中距离振动源越远,振动速度越小,在基床底层及下部地基范围内的振动速度处于较低水平,衰减速度明显减缓,说明基床对振动能量有明显的吸收作用。

图6为基床表层竖向速度响应与加载频率的关系曲线。由图6可知,基床表层振动速度响应幅值随加载频率的提高近似呈线性增长。

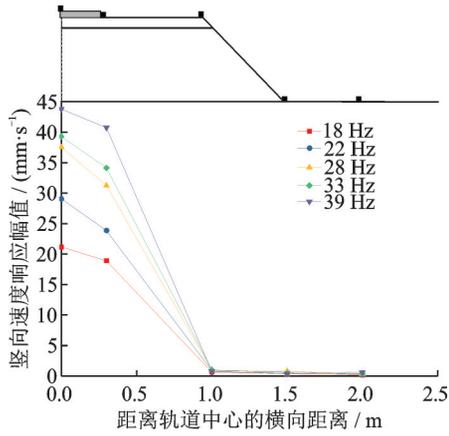


图 5 竖向速度响应幅值随轨道横向的分布

Fig. 5 Distribution of vertical velocity response amplitude with track transverse direction

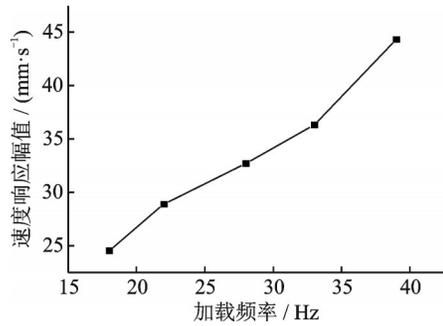


图 6 基床表层竖向速度响应幅值与加载频率的关系

Fig. 6 Vertical velocity response amplitude of subgrade bed surface with respect to loading frequency

### 2.2 动土应力分析

图 7 为加载频率 33 Hz 时, 垫层顶部桩顶、桩间土位置处动土应力的时程曲线。由于动力试验测试前需要将所有传感器“清零”, 所以本文涉及的动土应力测试均为动土应力增量。由图 7 可知, 试验时振动波在传播过程中受到路堤材料的影响, 振动能量逐渐衰减, 到达地基表层时 M 形波的波形特征已明显削弱, 且桩顶动土应力大于桩间土动土应力, 这是因为土拱效应和土工格栅的张力膜效应对荷载传递产生了作用, 使得更多的动荷载转移到桩顶上方, 桩顶承受的动土应力峰值约为 6.9 kPa, 桩间土承受

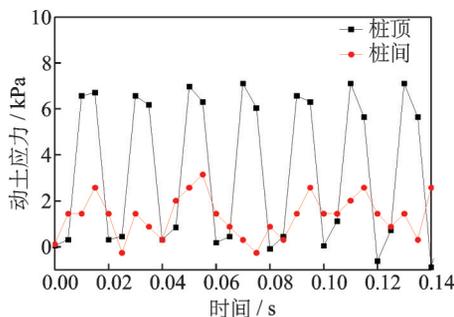


图 7 桩顶、桩间土动土应力时程曲线

Fig. 7 Dynamic stress of pile and soil with respect to time

的动土应力峰值约为 2.8 kPa, 前者为后者的 2.5 倍。

图 8 为垫层顶部桩顶、桩间土动土应力响应与加载频率的关系曲线。可以看出在振动荷载作用下, 地基中桩顶所承受的荷载大于桩间土, 桩顶承担了近 71% 的动荷载。随着加载频率的增加, 垫层顶部桩顶、桩间土动土应力响应比值基本不变, 说明加载频率的变化对复合地基模型荷载传递规律的影响很小。

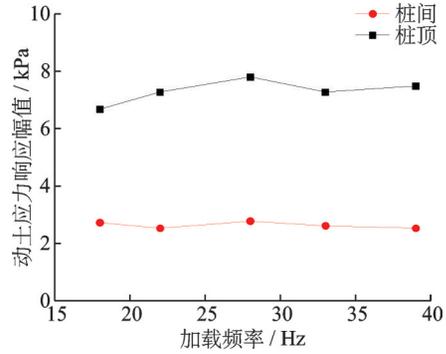


图 8 桩顶、桩间土动土应力响应幅值与加载频率的关系

Fig. 8 Response amplitude of dynamic stress of pile and soil with respect to loading frequency

### 2.3 动位移分析

图 9 为不同加载频率条件下轨道表层的动位移时程响应曲线。由图 9 可知, 轨道表层动位移呈现明显的 M 形, 试验中加载频率的变化对轨道表层的瞬态动位移响应峰值影响较小。振动速度在每个循环周期后会出现小幅波动, 这是因为动荷载作用于整个钢轨路堤地基系统后产生了一系列反射波, 这些反射波反作用于轨道板, 引起一系列微小振动。

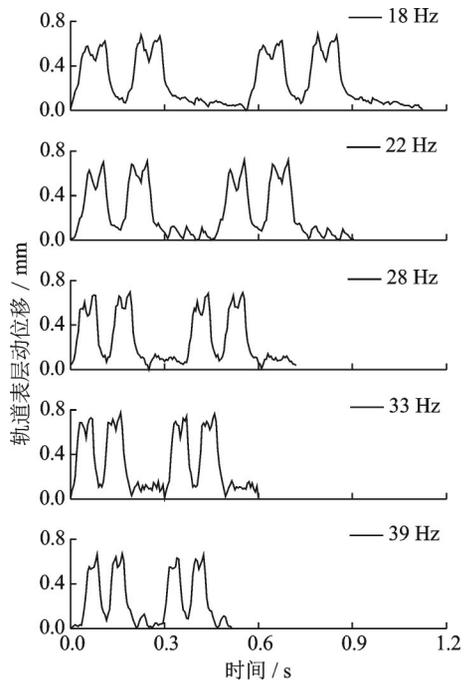


图 9 轨道表层动位移时程响应曲线

Fig. 9 Dynamic displacement of track surface with respect to time

### 3 数值模拟

#### 3.1 数值计算模型

为了进一步探究不同工况下的复合地基动力响应规律,利用三维有限元软件 PLAXIS 3D 建立如图 10 所示的数值计算模型,模型尺寸与试验采用的模型尺寸一致,模型共划分为 319488 个单元,548858 个节点。

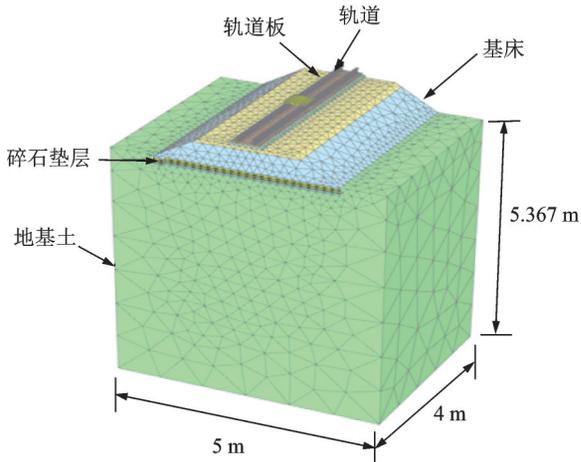


图 10 数值模型网格划分

Fig. 10 Meshes of numerical model

地基土、X 形桩、基床、轨道板及碎石垫层均采用实体单元模拟,本构模型均采用线弹性模型。建立的 X 形桩-网复合地基模型如图 11 所示。已有研究表明<sup>[19-20]</sup>,列车运行下,地基土动应变一般小于  $10^{-5}$ ,在这种情况下,土骨架变形能够恢复,土体处于弹性应力状态。因此,在进行数值模拟分析时,可将土体采用弹性本构模型进行考虑。在 X 形桩表面设置接触面,强度折减系数  $R_{int}$  取 0.67 来模拟桩土间的相互作用。土工格栅采用格栅单元模拟,拉伸强度为 30 kN/m。材料物理力学参数取值如表 3 所示。

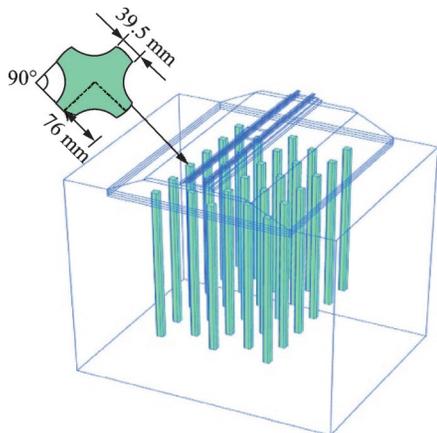


图 11 X 形桩-网复合地基模型

Fig. 11 Model of an XCC pile-net composite foundation

表 3 模型材料力学参数表

Tab. 3 Mechanical parameters of model materials

部件	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/MPa	泊松比
钢轨	78	$2.06\times 10^5$	0.2
轨道板	25	$3\times 10^4$	0.2
基床表层	22	110	0.3
基床底层	22	130	0.32
碎石垫层	20	150	0.3
地基土	18.6	20	0.35
桩	25	$3\times 10^4$	0.2

#### 3.2 有限元计算模型合理性验证

图 12 和 13 分别给出了加载频率为 33 Hz 时,数值计算和试验结果获得的轨道板表面和基床底部竖向速度结果对比图。通过对比可知,模拟得到的速度时程曲线与试验数据吻合较好,验证了数值模型的合理性。

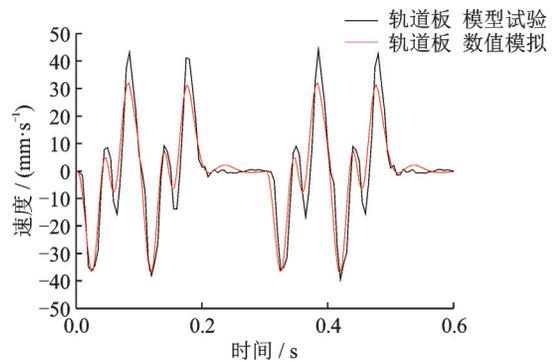


图 12 轨道板竖向速度有限元计算与试验结果对比

Fig. 12 Comparison between FE calculation and test results of vertical velocity at track slab

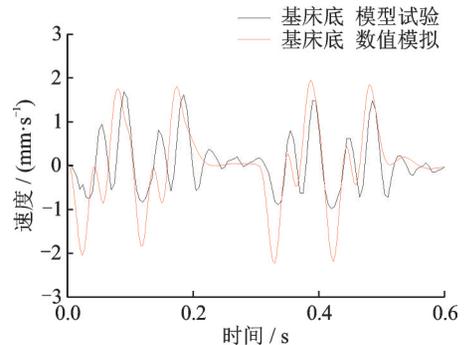


图 13 基床底部竖向速度有限元计算与试验结果对比

Fig. 13 Comparison between FE calculation and test results of vertical velocity at bottom layer of subgrade

#### 3.3 加载幅值与频率对振动速度响应的影响

图 14 显示的是不同加载频率对基床表层路肩处竖向振动速度的影响,保持加载幅值为 30 kN,当加载频率从 18 Hz 增加到 22 Hz,振动速度响应幅值增加了 70%,当加载频率增加到 33 Hz,振动速度响

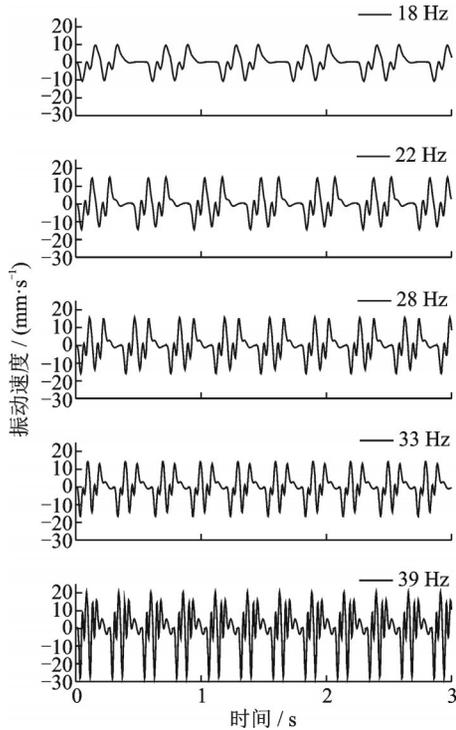


图 14 不同加载频率下基床表层振动速度时程响应  
Fig. 14 Time history response of surface vibration velocity of subgrade bed under different loading frequencies

应幅值增加了 162 %。

保持加载频率为 18 Hz,不同加载幅值下基床表层路肩处的竖向振动速度时程响应如图 15 所示,在不同的加载幅值下,基床表层竖向速度随循环荷载作用呈现明显的周期性变化。加载幅值从 10 kN 增加到 30 kN,振动速度响应幅值从 3.58 mm/s 增长到 10.75 mm/s,增长了 200%。可见加载幅值对振动速度产生很大影响,因此有必要限制列车轴重大小。

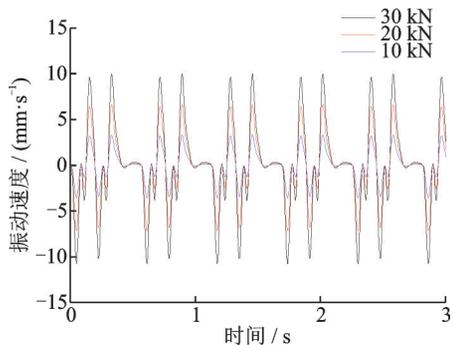


图 15 不同加载幅值下基床表层振动速度时程响应  
Fig. 15 Time history response of surface vibration velocity of subgrade bed under different loading amplitudes

以加载幅值 30 kN 为例,不同加载频率下振动速度响应沿路堤的横向变化规律如图 16 所示。由图 16 可知,振动速度响应幅值均沿路堤横向迅速衰减,且加载频率越大衰减速率越快。在不同加载频

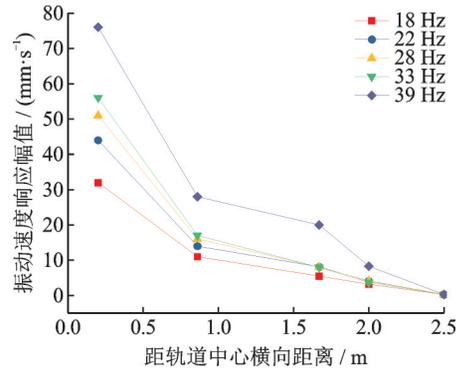


图 16 振动速度响应幅值沿路堤横向衰减图  
Fig. 16 The transverse attenuation of vibration velocity response amplitude along the embankment

率下,模型槽壁处振动速度均接近于零,可见铁路路堤能消耗列车运营产生的大部分能量,对周边环境影响较小。

不同加载频率下复合地基内部振动速度幅值沿深度方向的衰减规律如图 17 所示。在基床和碎石垫层范围内振动速度衰减程度最大,说明土工格栅加筋碎石垫层隔振效果较好,能吸收大量的振动能量,减小振动对周围地基土的影响。随着加载频率从 18 Hz 增加到 39 Hz,振动速度幅值在基床和垫层范围内衰减速率加快,即加载频率越大速度衰减越快。由此可见,在高频动荷载作用下,土工格栅加筋碎石垫层隔振效果明显。

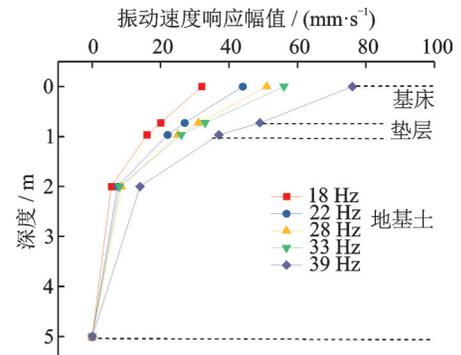


图 17 振动速度响应幅值沿复合地基深度方向衰减图  
Fig. 17 The transverse attenuation of vibration velocity response amplitude along the piled-embankment depth

### 3.4 土拱效应分析

图 18 给出了双层格栅加筋路堤在静载及不同频率动荷载作用下桩顶和桩间土的竖向应力分布曲线。由图 18 可知,静载作用下,在深度 0.3 m 范围内,桩顶、桩间竖向应力值基本相等,超过 0.3 m,桩顶、桩间竖向应力值差异逐渐增大,可见土拱效应大致在深度 0.3~0.72 m 范围内。而在不同频率动荷载作用下,桩顶应力和桩间应力变化幅度较小,这是因为土工格栅张力膜效应的发挥,使得动荷载作用下

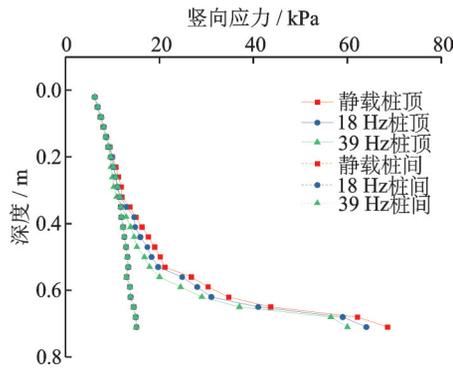


图 18 不同加载工况下竖向应力分布

Fig. 18 Vertical stress distribution under different loading conditions

由桩顶向桩间土转移的荷载减少。

为了进一步研究土工格栅对动载影响的减弱作用,计算了无筋路堤在不同加载频率下竖向应力沿深度的分布规律。如图 19 和 20 所示,随着动荷载频率的提高,桩顶应力逐渐减小而桩间应力逐渐增大,说明动荷载作用下土拱效应明显减弱,部分荷载由桩顶转移到桩间土,使得桩间土承担更大的荷载。

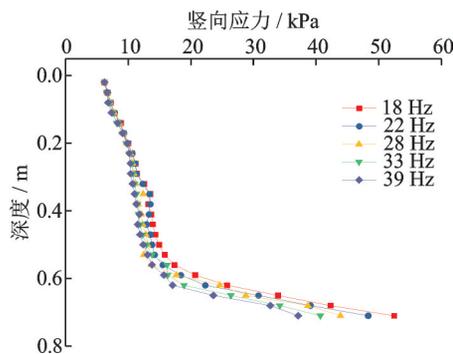


图 19 不同加载频率下无筋路堤桩顶竖向应力分布

Fig. 19 Vertical stress distribution on pile top of unreinforced embankment under different loading frequencies

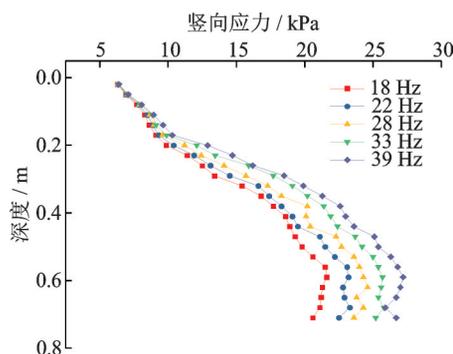


图 20 不同加载频率下无筋路堤桩间竖向应力分布

Fig. 20 Vertical stress distribution between piles in unreinforced embankment under different loading frequencies

图 21 为无筋路堤和双层土工格栅加筋路堤在不同加载频率下的桩顶、桩间土竖向应力比值。无

筋路堤随着加载频率的提高,应力比值逐渐减小,而双层格栅加筋路堤应力比值随加载频率的提高变化幅度较小。由此可见,土工格栅的张力膜效应能够减小动荷载对复合地基的影响。

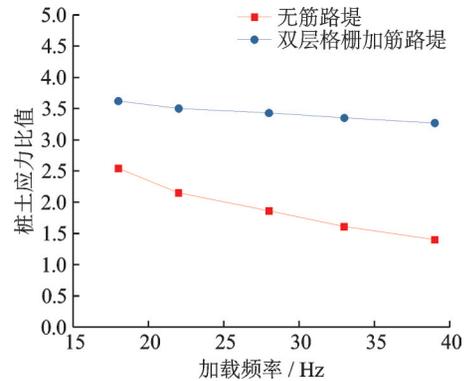


图 21 不同加载频率下桩土应力比值

Fig. 21 Pile soil stress ratio under different loading frequencies

## 4 结 论

本文通过开展不同加载频率下 X 形桩-网复合地基的大比例动力模型试验,并建立了相应的三维有限元分析模型,研究了不同加载频率及加载幅值下复合地基动力响应。主要得出以下结论:

(1) 竖向速度响应在路堤表层处最大,从轨道板表面到路堤底面范围内衰减了 90%。速度沿复合地基横向和深度方向迅速衰减,在路堤和垫层范围衰减较快,下部地基范围衰减速率明显减缓。振动速度的衰减程度随加载频率的提高逐渐增大。

(2) 轨道表层动位移随时间呈现明显的“M”形周期变化,试验过程中加载频率的改变对轨道表层的瞬态动位移响应峰值影响不大。

(3) 桩-网结构地基内部动应力传递规律和静应力传递规律一致,试验测得的桩顶承受的动土应力峰值为桩间土的 2.5 倍。

(4) 无筋路堤在动荷载作用下桩顶竖向应力减小,桩间竖向应力增大,土拱效应明显减弱,随着加载频率的提高,桩土应力比值逐渐减小。由于存在土工格栅张力膜效应,双层土工格栅加筋路堤荷载传递受动荷载作用影响较小,随着加载频率的提高,桩土应力比值变化幅度较小。

### 参考文献:

[1] Heckl M A. Railway noise—can random sleeper spacings help?[J]. Acustica, 1995, 81(6): 559-564.

- [2] Takemiya H, Bian X C. Substructure simulation of inhomogeneous track and layered ground dynamic interaction under train passage[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2005, 131(7): 699-711.
- [3] Bahrekazemi M, Bodare A. Effects of lime-cement soil stabilization against train induced ground vibrations[A]. *Third International Conference on Grouting and Ground Treatment*[C]. New Orleans, Louisiana, 2003.
- [4] 肖宏, 蒋关鲁, 魏永幸. 遂渝线无砟轨道桩网结构路基现场动车试验测试分析[J]. *铁道学报*, 2010, 32(1): 79-84.  
Xiao Hong, Jiang Guanlu, Wei Yongxing. Dynamic test analysis on ballastless-track column-net structure subgrade of the Suining-Chongqing railway line[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2010, 32(1): 79-84.
- [5] Anderson W F, Key A J. Model testing of two-layer railway track ballast[J]. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, 2000, 126(4): 317-323.
- [6] Cox S J, Wang A, Morison C, et al. A test rig to investigate slab track structures for controlling ground vibration[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 293(3-5): 901-909.
- [7] 许朝阳, 周锋, 吕惠, 等. 动荷载下桩承式路堤的承载特性及机制研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(11): 3231-3239.  
Xu Chaoyang, Zhou Feng, Lü Hui, et al. Study on bearing characteristics and mechanism of pile-supported embankment under dynamic load[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(11): 3231-3239.
- [8] Momoya Yoshitsugu, Sekine Etsuo, Tatsuoka Fumio. Deformation characteristics of railway roadbed and subgrade under moving-wheel load[J]. *Soils and Foundations*, 2005, 45(4): 99-118.
- [9] AI Shaer A, Duhamel D, Sab K, et al. Experimental settlement and dynamic behavior of a portion of ballasted railway track under high speed trains[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, 316(1-5): 211-233.
- [10] Ishikawa T, Sekine E, Miura S. Cyclic deformation of granular material subjected to moving-wheel loads[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, 48(5): 691-703.
- [11] 刘汉龙, 刘芝平, 王新泉. 现浇 X 型混凝土桩截面几何特性研究[J]. *中国铁道科学*, 2009, 30(1): 17-23.  
Liu Hanlong, Liu Zhiping, Wang Xinquan. Study on geometric characteristics of cast-in-place XCC concrete pile section[J]. *China Railway Science*, 2009, 30(1): 17-23.
- [12] 刘汉龙, 金辉, 丁选明, 等. 现浇 X 形混凝土桩沉桩挤土效应现场试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(S2): 219-223.  
Liu Hanlong, Jin Hui, Ding Xuanming, et al. Field experimental study on soil compaction effect of cast-in-place XCC concrete pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(S2): 219-223.
- [13] 尹锋, 周航, 刘汉龙, 等. 车辆载重与动荷载对 X 形桩-网复合地基动力特性影响的试验研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(4): 1324-1330.  
Yin Feng, Zhou Hang, Liu Hanlong, et al. Experimental study on the influence of vehicle load and dynamic load on dynamic characteristics of XCC pile net composite foundation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(4): 1324-1330.
- [14] 赵明华, 陈大兴, 刘猛, 等. 考虑土拱效应影响的路堤荷载下土工格室加筋体变形分析[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(4): 601-609.  
Zhao Minghua, Chen Daxing, Liu Meng, et al. Deformation analysis of geocell-reinforced body under embankment load considering soil arch effect[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(4): 601-609.
- [15] 鲍宁, 魏静, 陈建峰. 桩承式路堤土拱效应三维离散元分析[J]. *岩土力学*, 2020, 41(S1): 347-354.  
Bao Ning, Wei Jing, Chen Jianfeng. Three dimensional discrete element analysis of soil arching effect of pile supported embankment[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(S1): 347-354.
- [16] 付海平, 郑俊杰, 赖汉江. 桩承式路堤"土拱结构"形成演化规律离散元分析[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(11): 2050-2057.  
Fu Haiping, Zheng Junjie, Lai Hanjiang. Discrete element analysis on formation and evolution of soil arch structure of pile supported embankment [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(11): 2050-2057.
- [17] 赖汉江, 郑俊杰, 崔明娟. 循环荷载下低填方桩承式路堤动力响应分析[J]. *岩土力学*, 2015, 36(11): 3252-3258.  
Lai Hanjiang, Zheng Junjie, Cui Mingjuan. Dynamic response analysis of low fill pile supported embankment under cyclic load[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(11): 3252-3258.
- [18] 房营光, 侯明勋, 谷任国, 等. 桩承式路堤中土拱效应产生过程可视化分析[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(9): 1678-1684.  
Fang Yingguang, Hou Mingxun, Gu Renguo, et al. Visual analysis of soil arching effect in pile supported embankment [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(9): 1678-1684.
- [19] 夏禾, 张楠. 车辆与结构动力相互作用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.  
Xia He, Zhang Nan. *Dynamic Interaction between Vehicle and Structure*[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [20] 王其昌. 高速铁路土木工程[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2001.  
Wang Qichang. *Civil Engineering of High Speed Railway* [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2001.

## Dynamic response of XCC pile-net composite foundation under train loading

CHEN Yu-min<sup>1,2</sup>, XIE Yun-fei<sup>1,2</sup>, XUE Shan-shan<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin-lei<sup>1,2</sup>

(1.Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2.College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Based on the large-scale model test on the XCC pile-net composite foundation subjected to dynamic loading induced by high-speed train, the distribution characteristics of vibration velocity, dynamic stress, and dynamic displacement of foundation soil are analyzed under different train speeds. The vibration response of the track-subgrade system and attenuation law of dynamic stress of foundation soil under cyclic loading are discussed. A numerical model is established in this paper using PLAXIS 3D to study the effect of axle weight and vibration frequency of train on the vibration response of the composite foundation. Moreover, the vertical stress distributions of pile top soil and soil between piles under dynamic loading are compared between non-reinforced embankment and double-layered geogrid reinforced embankment. The results show that the vertical displacement of the track slab changes periodically with the time of "M" type; the vertical velocity is the largest at the surface of the embankment, and gradually attenuates along the horizontal and depth direction of the foundation. The vertical velocity attenuates nearly 90% in the embankment. With the increase of loading frequency and loading amplitude, the vibration velocity of soil increases gradually. The dynamic loading has a significant effect on the unreinforced embankment, which weakens the soil arching effect. The vertical stress ratio of pile to soil decreases with the increase of loading frequency. Additionally, the tension membrane effect of geogrid reinforced embankment can reduce the influence of dynamic loading on composite foundation.

**Key words:** high speed railway; XCC pile; pile-net composite foundation; pile soil dynamic interaction

**作者简介:** 陈育民(1981—),男,博士,教授。电话:13951852041;E-mail: ymch@vip.163.com。